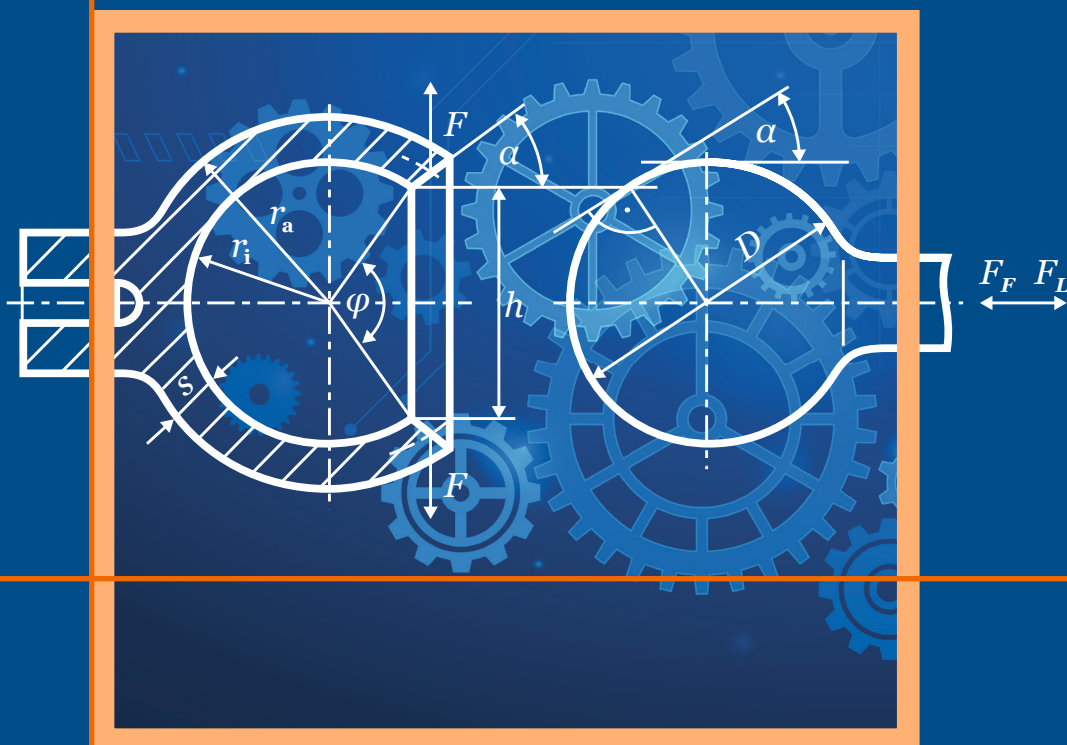


Bernd-Rüdiger Meyer

# Entwicklung und Konstruktion von Kunststoffteilen

Anwendungsorientierte Arbeitsunterlagen



HANSER





**Bleiben Sie auf dem Laufenden!**

Hanser Newsletter informieren Sie regelmäßig über neue Bücher und Termine aus den verschiedenen Bereichen der Technik. Profitieren Sie auch von Gewinnspielen und exklusiven Leseproben. Gleich anmelden unter

**[www.hanser-fachbuch.de/newsletter](http://www.hanser-fachbuch.de/newsletter)**

## **Die Internet-Plattform für Entscheider!**

**Exklusiv:** Das Online-Archiv der Zeitschrift Kunststoffe!

**Richtungsweisend:** Fach- und Brancheninformationen  
stets top-aktuell!

**Informativ:** News, wichtige Termine, Bookshop, neue  
Produkte und der Stellenmarkt der Kunststoffindustrie

***Kunststoffe*.de**

Bernd-Rüdiger Meyer

# **Entwicklung und Konstruktion von Kunststoffteilen**

Anwendungsorientierte Arbeitsunterlagen

HANSER

Der Autor:

*Prof. Dipl. Ing. Bernd-Rüdiger Meyer, 15517 Fürstenwalde*



Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <<http://dnb.ddb.de>> abrufbar.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutzgesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Alle in diesem Buch enthaltenen Verfahren bzw. Daten wurden nach bestem Wissen dargestellt. Dennoch sind Fehler nicht ganz auszuschließen. Aus diesem Grund sind die in diesem Buch enthaltenen Darstellungen und Daten mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Autoren und Verlag übernehmen infolgedessen keine Verantwortung und werden keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Art aus der Benutzung dieser Darstellungen oder Daten oder Teilen davon entsteht.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Buches oder Teilen daraus, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Einwilligung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder einem anderen Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung – mit Ausnahme der in den §§ 53, 54 URG genannten Sonderfälle –, reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

© 2021 Carl Hanser Verlag München

[www.hanser-fachbuch.de](http://www.hanser-fachbuch.de)

Herstellung: Jörg Strohbach

Coverconcept: Marc Müller-Bremer, [www.rebranding.de](http://www.rebranding.de), München

Titelmotiv: Max Kostopoulos, unter Verwendung von Grafiken von © [shutterstock.com.de](http://shutterstock.com.de)/Tartila

Satz: Eberl & Koesel Studio GmbH, Krugzell

Druck und Bindung: CPI books GmbH, Leck

Printed in Germany

ISBN: 978-3-446-46292-2

E-Book-ISBN: 978-3-446-46841-2

*Für meine Ehefrau Dagmar in Dankbarkeit für die unverzichtbare und selbstlose  
Mitarbeit bei der Zusammenstellung und Gestaltung der Grundlagen zu diesem Buch.*





# Inhalt

<b>Vorwort</b> .....	XXI
<b>Der Autor</b> .....	XXIII
<b>1 Struktur – Eigenschaftsbeziehungen der Polymere</b> .....	1
1.1 Übersichten .....	1
1.2 Konstitution und Konfiguration der Makromoleküle .....	4
1.2.1 Zusammensetzung, Größe und Gestalt der Makromoleküle .....	4
1.2.2 Zwischenmolekulare Kräfte (ZMK) .....	9
1.2.3 Chemische Struktur thermoplastischer Polymere .....	11
1.2.4 Nomenklatur und Kurzzeichen spezieller Polymergruppen .....	18
1.3 Konformation und Aggregation der Makromoleküle .....	19
1.3.1 Einführung .....	19
1.3.2 Molekulare und morphologische Ordnungsstrukturen ..	21
1.3.3 Thermische Zustandsänderungen der Polymere .....	24
1.3.4 Vernetzungsstrukturen der Polymere .....	26
1.3.5 Abmessungsbereiche molekularer und morphologischer Strukturelemente .....	29
1.3.6 Löslichkeit und Quellbarkeit der Polymere .....	30
1.4 Dilatometrisches und mechanisches Eigenschaftsbild der Kunststoffe .....	31
1.4.1 Thermische Zustände und Übergangsbereiche von Polymeren (außer LCP) .....	31
1.4.2 p-v-T-Verhalten von Thermoplasten .....	32
1.4.3 Bereiche mechanischer und dilatometrischer Eigenschaften der Polymere (außer LCP) .....	33

1.4.4	Orientierung molekularer und morphologischer Strukturen durch Reck- und Fließprozesse .....	34
1.4.5	Zeitabhängiges Deformationsverhalten der Polymere ...	35
1.5	Stoffliche Modifizierung der Polymere .....	36
1.5.1	Funktionsadditive und chemische Modifizierung .....	36
1.5.2	Füll- und Verstärkungsstoffe .....	38
1.5.3	Schaumstoffe .....	41
1.5.4	Äußere Weichmachung und Brennbarkeitsminderung ..	43
1.5.5	Polymermischungen und Werkstoffkombinationen .....	44
<b>2</b>	<b>Systematische Kunststoffauswahl für Formstoffe .....</b>	<b>49</b>
2.1	Übersicht .....	49
2.1.1	Gliederung der Anforderungen .....	50
2.1.2	Werkstoffentscheidung .....	50
2.1.3	Software zur Kunststoffvorauswahl .....	52
2.2	Einführung zur Kunststoffauswahl .....	52
2.2.1	Richtlinien für die Kunststoffvorauswahl .....	52
2.2.2	Übergeordnete Polymerstrukturmatrix und Beständigkeitskriterien der Kunststoffe .....	53
2.3	Medienbeständigkeit und Wasseraufnahme .....	57
2.3.1	Medienbeständigkeit (ohne Spannungsrisssbildung) ....	57
2.3.2	Bewertung der Medienbeständigkeit (ohne Spannungsrisssbildung) .....	60
2.3.3	Wasseraufnahme .....	62
2.4	Wärmealterungsbeständigkeit und hydrothermische Beständigkeit .....	64
2.4.1	Wärmealterungsbeständigkeit .....	64
2.4.2	Hydrothermische Beständigkeit .....	68
2.5	Strahlenbeständigkeit und Witterungsbeständigkeit .....	68
2.5.1	Strahlenbeständigkeit .....	68
2.5.2	Witterungsbeständigkeit .....	70
2.6	Werkstoffdichte und Kohäsionsenergiedichte .....	72
2.6.1	Werkstoffdichte .....	72
2.6.2	Kohäsionsenergiedichte .....	72
2.7	Steifigkeit/Härte und Wärmedehnung .....	73
2.7.1	Steifigkeit/Härte .....	73
2.7.2	Wärmedehnung .....	77

2.8	Wärmeformbeständigkeit, Kriechneigung und mechanische Dämpfung .....	78
2.8.1	Wärmeformbeständigkeit .....	78
2.8.2	Kriechneigung der Kunststoffe .....	83
2.8.3	Mechanische Dämpfung .....	83
2.9	Umgebungsbedingte Spannungsrisbildung (ESC) .....	84
2.9.1	Spannungsrisbildung (ESC) im Zusammenhang mit der Kunststoffvorauswahl .....	84
2.9.2	Phänomen .....	85
2.9.3	Rissbildungsarten .....	86
2.9.4	Umgebungsbedingungen .....	87
2.9.5	Medienaktivität bei Thermoplasten .....	88
2.9.6	Richtwertbereiche kritischer Dehnungen aus Prüfungen in Luftumgebung .....	90
2.10	Dehnbarkeit und Schlagzähigkeit .....	91
2.10.1	Einleitung .....	91
2.10.2	Dehnbarkeit .....	92
2.10.3	Schlagzähigkeit .....	93
2.11	Reibung und Verschleiß .....	94
2.11.1	Einleitung .....	94
2.11.2	Gleitreibungskoeffizient ( $\mu$ ) .....	95
2.11.3	Verschleiß .....	96
2.12	Lichtdurchlässigkeit (Transparenz) .....	98
2.13	Brennbarkeit und Verbrennungsenthalpie .....	99
2.13.1	Einleitung .....	99
2.13.2	Brennbarkeit .....	99
2.13.3	Verbrennungsenthalpie (unterer Heizwert) .....	101
2.14	Elektrisches Isoliervermögen und elektrostatische Aufladbarkeit .....	104
2.15	Dielektrische Verluste und Kriechstromfestigkeit .....	105
2.15.1	Dielektrische Verluste .....	105
2.15.2	Kriechstromfestigkeit .....	107
2.16	Wärmeleitung .....	109
2.16.1	Einleitung .....	109
2.16.2	Bereiche und Vergleichswerte von Wärmeleitkennwerten bei 23 °C .....	110
2.16.3	Auswahl Aspekte .....	110
2.16.4	Berechnung der Wärmeleitkennzahlen von Kunststoffen mit festen Zusatzstoffen .....	111
2.16.5	Wärmeübertragung bei Kontakt von Feststoffschichten .....	112

2.17	Maßhaltigkeit von Kunststoff-Formteilen .....	113
2.17.1	Einleitung .....	113
2.17.2	Verarbeitungsschwindung (VS) von Kunststoff-Formmassen .....	114
2.17.3	Toleranzgruppen (TG) als Bewertungsmaßstab der Fertigungsgenauigkeit nach DIN 16742 und DIN ISO 20457 .....	116
2.17.4	Anwendungsbedingte Maßänderungen .....	118
2.18	Klimadaten für technische Anwendungen .....	123
2.18.1	Einleitung .....	123
2.18.2	Klimabegriffe und Klimagrößen .....	123
2.18.3	Klimadaten für Freiluftklimamodelle .....	125
2.18.4	Klimadaten für Raumklimamodelle .....	126
2.18.5	Kennzeichnung der Freiluftklimagebiete der Erde .....	126
2.18.6	Bestimmung der klimaabhängigen Wassersättigungskonzentration für Kunststoffe und andere Werkstoffe .....	129
2.19	Demonstrationsbeispiel zur Kunststoffvorauswahl .....	129
<b>3</b>	<b>Überschlägige Bestimmung deformationsmechanischer Kennwerte von Kunststoffen .....</b>	<b>131</b>
3.1	Einführung .....	131
3.2	Abschätzmethoden .....	136
3.2.1	Basisdaten aus Normprüfung kohärenter Kompaktstoffe .....	136
3.2.2	Zeitverlaufsarten (ZVA) .....	137
3.2.3	Reduktionsfaktoren (F) .....	138
3.2.4	Linearitätsfaktoren, Deformationskennwerte, zulässige Spannungen .....	140
3.2.5	Gewaltbruchsicherheit .....	141
3.3	Ausgewählte Stützkernstoffe für Verbundkonstruktionen .....	142
3.3.1	Einleitung .....	142
3.3.2	Homogene Polyurethanhartschaumstoffe (PUR-HS) .....	142
3.3.3	Papierwabenstoffe .....	143
3.4	Strukturschaumstoffe (Integralschaumstoffe) .....	144
3.4.1	Einleitung .....	144
3.4.2	Bestimmung des Ersatzursprungsmodul $E_{R0}$ für flächige Strukturschaumstoffbauteile .....	145
3.5	Bestimmung des wirtschaftlichen Fasergehalts mechanisch beanspruchter Verbundkunststoffe (Composite) .....	147

<b>4</b>	<b>Nachweis der Knick-, Kipp- und Beulstabilität für Leichtbaukonstruktionen</b> .....	151
4.1	Berechnungsgrundlagen .....	151
4.1.1	Einleitung .....	151
4.1.2	Basisgleichungen für die Stabilitätsnachweise .....	152
4.2	Biegedrillknicken von geraden Stäben und Trägern .....	154
4.2.1	Einleitung .....	154
4.2.2	Einspannfälle und Einspannwerte für das Biegeknicken .....	155
4.2.3	Querschnittskennwerte .....	156
4.2.4	Stabknicken durch mittige und richtungstreue Axialdruckkräfte .....	157
4.2.5	Kippen biegebeanspruchter Träger .....	158
4.2.6	Berechnungsparameter für Kippbeanspruchung .....	159
4.2.7	Scheitelknicken biegebeanspruchter Träger mit Hohlzylinderquerschnitt .....	162
4.2.8	Örtliches Beulen von Stäben (Profilen) mit Querschnitten aus dünnwandigen Scheiben bei Axialdruckbelastung ..	162
4.2.9	Berechnungsbeispiel zum örtlichen Scheibenbeulen ...	167
4.3	Beulen von Platten und Plattenstreifen .....	169
4.3.1	Einleitung .....	169
4.3.2	Beulen von Rechteckplatten durch einachsige Druckbeanspruchung .....	169
4.3.3	Beulen isotroper Platten durch konstante Randdruckspannungen .....	171
4.3.4	Beulen von Rechteckplatten durch konstante Randschubspannungen .....	172
4.4	Beulen oder Knicken dünnwandiger Schalen .....	173
4.4.1	Einleitung .....	173
4.4.2	Beulen oder Drillknicken dünnwandiger Hohlzylinder durch Torsionsbeanspruchung .....	174
4.4.3	Beulen oder Knicken dünnwandiger Hohlzylinder durch Axialdruckbeanspruchung und/oder Biegebeanspruchung .....	176
4.4.4	Beulen dünnwandiger Hohlzylinder durch Radialdruckbeanspruchung (Manteldruck) .....	178
4.4.5	Beulen oder Knicken dünnwandiger Hohlzylinder durch kombinierte Beanspruchung .....	179
4.4.6	Beulen und Knicken von Kegelschalen .....	180
4.4.7	Beulen offener Zylinderschalen durch Axialdruckbeanspruchung .....	181

4.4.8	Beulen dünnwandiger Hohlzylinder durch Radialdruckbeanspruchung bei elastischer Außenbettung .....	182
4.4.9	Beulen ringverstärkter Hohlzylinder durch Radialdruckbeanspruchung (Manteldruck) .....	183
4.4.10	Beulen von Hohlzylindern mit profilierten und/oder mehrschichtigen Wänden durch Radialdruckbeanspruchung (Manteldruck) bei bekannter Ringsteifigkeit .....	186
4.4.11	Beulen dünnwandiger und isotroper Kugelschalen durch radiale Druckbeanspruchung .....	187
4.5	Stabilitätsnachweise für Stützkernverbundbauteile (Sandwichkonstruktionen) .....	188
4.5.1	Einleitung und Voraussetzungen .....	188
4.5.2	Örtliches Beulen bei Stützkernverbundbauteilen .....	189
4.6	Berechnungsbeispiele .....	190
<b>5</b>	<b>Bestimmung von Wärmeübergangszahlen für Wärmeübertragungsvorgänge der Polymerverarbeitung und -anwendung .....</b>	<b>193</b>
5.1	Problemabgrenzung und Zielbestimmung .....	193
5.2	Stoffkennwerte für die Wärmeübergangsrechnung .....	195
5.2.1	Stoffdaten für Wärmeträgermedien .....	195
5.2.2	Emissionsgrade wärmeabstrahlender Körperoberflächen (Graustrahler) .....	198
5.3	Thermische und rheologische Randbedingungen der Wärmeübergangsrechnung .....	200
5.4	Ähnlichkeitskennzahlen des konvektiven Wärmeübergangs ...	203
5.5	Wärmeübergangszahlen für durchströmte Kanäle .....	205
5.5.1	Kanalgrundformen .....	205
5.5.2	Bestimmungsgrößen der Kanäle .....	207
5.5.3	Nußeltgleichungen .....	208
5.5.4	Querschnittsabhängige Kennwerte und Thermikfaktoren .....	210
5.5.5	Oberflächenzustand und Sandraugigkeitskennwerte der Kanäle .....	212
5.6	Wärmeübergangszahlen für Einzelkörper in isothermer Umgebung .....	214
5.6.1	Umgebungsmodell und Berechnungskonzept .....	214
5.6.2	Wärmeübergangszahlen durch freie und erzwungene Konvektion .....	216

5.6.3	Wärmeübergangszahlen durch Wärmeleitung in das Konvektionsmedium .....	218
5.6.4	Äquivalente Wärmeübergangszahlen durch Wärmestrahlung .....	219
5.7	Wärmeübergangszahlen für Filmkondensation von Wasserdampf .....	220
5.8	Wärmeübergangszahlen für geschlossene Spaltquerschnitte mit Fluidfüllung .....	221
5.9	Äquivalente Wärmeübergangszahlen durch Rippenwirkung von Aufspannplatten .....	223
5.10	Anwendungsbeispiele .....	225
<b>6</b>	<b>Ausgewählte rheologische Grundlagen für Thermoplastschmelzen .....</b>	<b>227</b>
6.1	Scherströmung und Stoffansätze .....	227
6.1.1	Einleitung .....	227
6.1.2	Rheologische Stoffansätze für stationäres Scherfließen strukturviskoser Fluide ohne Fließgrenze .....	229
6.1.3	Abnahme der Viskosität und Vergrößerung der entropieelastischen Rückverformungskräfte durch strömungsbedingte Molekülorientierung .....	232
6.2	Rheologische Bestimmungsgrößen und Strömungsverlaufsformen .....	233
6.2.1	Druckströmung in beheizten Kanälen (z. B. Extrusion) .....	233
6.2.2	Scherströmung mit Randschichterstarrung (z. B. Spritzgießen) .....	234
6.2.3	„Strömungslegenden“ bei volumetrischer Werkzeugfüllung durch Quellströmung .....	235
6.2.4	Überlagerung von Scher- und Dehnströmungen beim Spritzgießen .....	236
6.3	Bestimmung der rheologisch repräsentativen Fluidtemperatur bei Druckströmungen .....	237
6.3.1	Aufgabenstellung und Berechnungsmodell .....	237
6.3.2	Strömungstemperaturfeld ohne Randschichterstarrung	237
<b>7</b>	<b>Grundlagen des werkstofflichen Recycling von Kunststoffen</b>	<b>239</b>
7.1	Entsorgungsmethoden und Stoffkreisläufe .....	239
7.1.1	Entsorgungsmethoden .....	239

7.1.2	Stoffkreisläufe der Kunststoffverarbeitung und -anwendung .....	241
7.1.3	Verarbeitungskreislaufmodell für die Ermittlung zulässiger Rezyclatanteile .....	241
7.1.4	Ausgewählte Veröffentlichungen zum Thema .....	242
7.2	Werkstoffliche Voraussetzungen für Kunststoffrecycling und Regeln für das recyclingorientierte Entwickeln von Kunststoffteilen .....	243
7.2.1	Eigenschaftsänderung der Kunststoffe bei Verarbeitung und Anwendung .....	243
7.2.2	Regeln und Richtlinien für das recyclingorientierte Entwickeln von Kunststoffteilen .....	244
7.3	Wiederverarbeitungsstrategien für Thermoplastrezyclat in geschlossenen Verarbeitungskreisläufen .....	246
7.3.1	Minimalstrategie: Kein Rezyclatzusatz bzw. nur geringe Rezyclatanteile zum Originalmaterial .....	246
7.3.2	Blendstrategie: Eigenschaftsoptimierte Mischung aus Rezyclat und Originalmaterial .....	246
7.3.3	Maximalstrategie: Kein Originalmaterialzusatz zum Rezyclat .....	247
7.4	Mathematische Modellierung der Verarbeitungskreisläufe .....	248
7.4.1	Materialzusammensetzung der Fertigteile in Verarbeitungskreisläufen (Beispiel) .....	248
7.4.2	Eigenschaftsaddition .....	249
7.5	Demonstrationsbeispiele .....	251
<b>8</b>	<b>Orientierende Wirtschaftlichkeitsvergleiche für Fertigungs- varianten zur Herstellung von Spritzgieß- und Pressteilen ...</b>	<b>255</b>
8.1	Einführung .....	255
8.1.1	Zielstellung .....	255
8.1.2	Voraussetzungen und Handhabung .....	255
8.2	Bestimmung von Basisdaten für Fertigungsvarianten .....	257
8.2.1	Verfahrenszuordnung und Fertigungsstückzahlen .....	257
8.2.2	Verfügbare Maschinenlaufzeit und Ausschussabschätzung .....	258
8.2.3	Arbeitsplatzstruktur, Maschinenbelegung und Maschinenbedienung .....	258
8.3	Abschätzung der Verschleißstandzahl für Spritzgieß- und Presswerkzeuge .....	260
8.3.1	Einleitung .....	260



8.3.2	Abschätzkonzept für die Verschleißstandzahl .....	260
8.3.3	Kompliziertheit des Werkzeugaufbaus ( $a_1$ ) .....	261
8.3.4	Mechanische Werkzeugbeanspruchung ( $a_2$ ) .....	262
8.3.5	Verschleißwiderstand der Werkzeugkonturteile ( $a_3$ ) ....	262
8.3.6	Kanturoberflächenbeschaffenheit ( $a_4$ ) .....	263
8.3.7	Fertigungstoleranzforderungen ( $a_5$ ) .....	263
8.3.8	Abrasionsverschleiß durch Polymerschmelzen ( $a_6$ ) ....	264
8.4	Überschlägige Berechnung von Maschinenstundensätzen für Spritzgießmaschinen und Pressen .....	265
8.4.1	Einleitung .....	265
8.4.2	Maschinenteilkostensatz .....	265
8.4.3	Raumnutzungsteilkostensatz .....	266
8.4.4	Energieteilkostensatz .....	267
8.5	Kalkulation der Vergleichsstückkosten .....	268
8.5.1	Berechnungskonzept .....	268
8.5.2	Materialkosten ( $K'_M$ ) .....	269
8.5.3	Fertigungskosten ( $K'_F$ ) .....	270
8.5.4	Werkzeugkosten ( $K'_W$ ) .....	270
8.5.5	Ausschuss- und Qualitätssicherungskosten .....	271
8.6	Bestimmung optimaler Werkzeugfachzahlen, des Werkzeugbedarfs und der Maschinenbelegungszeit .....	271
8.6.1	Einleitung .....	271
8.6.2	Berechnung der optimalen Fachzahl .....	272
8.6.3	Werkzeugbedarf und Maschinenbelegungszeit .....	273
8.7	Bestimmung gewinnoptimaler Losgrößen .....	274
8.8	Strukturierung zeitlicher Fertigungsabläufe in der kunststoffverarbeitenden Industrie (kvl) .....	275
8.9	Demonstrationsbeispiel .....	277
<b>9</b>	<b>Bestimmung der Zykluszeit für das Thermoplastspritzgießen</b> .....	<b>281</b>
9.1	Einführung .....	281
9.2	Polymer- und Zusatzstoffdatei .....	283
9.3	Stoffdaten der Formmassen und Werkzeugkonturwerkstoffe ...	292
9.4	Spritzlinggeometrie .....	294
9.5	Auswahl der Verarbeitungsparameter nach Qualitätsanforderungen und rheologischen Bedingungen .....	308
9.5.1	Werkzeugtemperierung .....	308
9.5.2	Massetemperatur ( $\vartheta_M$ ) und Einspritzdruck ( $p_s$ ) .....	310

9.5.3	Entformungstemperatur .....	310
9.5.4	Festlegung der Werkzeugkonturtemperatur bei Einspritzbeginn ( $\vartheta_W$ ) .....	313
9.5.5	Mehrkomponentenspritzgießen .....	313
9.6	Kühlzeitberechnungsgleichungen .....	314
9.7	Zykluszeitberechnung .....	315
9.8	Berechnungsbeispiele .....	316
<b>10</b>	<b>Berechnung von Kunststoffstirradgetrieben .....</b>	<b>319</b>
10.1	Berechnungsgegenstand .....	319
10.2	Werkstoffdaten .....	322
10.2.1	Basisdaten für Kunststoffe und Metalle .....	322
10.2.2	Maximal zulässige Zahnflankentemperatur ( $\vartheta_{Fmax}$ ) .....	324
10.2.3	Bestimmung des Reibungskoeffizienten ( $\mu$ ) .....	324
10.2.4	Steifigkeits- und Festigkeitsdaten für Kunststoffe ( $E_K, \nu_K, \sigma_{FP}, \sigma_{HP}$ ) .....	325
10.3	Zahnradberechnung .....	326
10.3.1	Geometrie- und Betriebsdaten .....	327
10.3.2	Zahnradspannungen und -verformungen sowie thermische Funktionsparameter einschließlich Sicherheitsnachweise .....	329
10.4	Berechnungsbeispiele .....	333
<b>11</b>	<b>Berechnung und Gestaltung von Schnappverbindungen .....</b>	<b>339</b>
11.1	Verbindungsprinzip und Verbindungsarten .....	339
11.2	Konstruktionshinweise .....	341
11.3	Rastelemente und Werkstoffdaten .....	342
11.3.1	Geometrie und Reibkraftübersetzung von Rastelementen .....	342
11.3.2	Reibungskoeffizient, Deformationsmechanik, Festigkeitsnachweis .....	344
11.4	Funktionsnachweis für Torsionsschnappverbindungen .....	344
11.4.1	Berechnungskonzept .....	344
11.4.2	Torsionsfederquerschnittskennwerte .....	345
11.4.3	Geometrisches Modell und Belastungsschema .....	346
11.4.4	Festigkeitsnachweis und Betriebskraftberechnung .....	346
11.5	Funktionsnachweise für Biegeschnappverbindungen einschließlich segmentierter Zylinderschnappverbindungen ...	347

11.5.1	Berechnungskonzept	347
11.5.2	Flächenträgheitsmomente, Querschnittsflächen und Randfaserabstände typischer Biegefederquerschnitte	348
11.5.3	Funktionsnachweis für gerade Biegefedern (Kragträger)	349
11.5.4	Funktionsnachweis für gekrümmte Biegefedern (Bogenträger)	351
11.6	Funktionsnachweise für geschlitzte Zylinderschnappverbindungen	352
11.6.1	Berechnungskonzept	352
11.6.2	Geometrisches Modell und Belastungsschema	352
11.6.3	Festigkeitskontrolle am Innenrand (Einspannstelle in Abbildung: ---)	353
11.6.4	Füge- und Lösekraft	353
11.7	Funktionsnachweise für geschlossene Zylinderschnappverbindungen	353
11.7.1	Berechnungskonzept	353
11.7.2	Geometrisches Modell und Belastungsschema	354
11.7.3	Deformationsmechanische Werkstoffkennwerte	355
11.7.4	Festigkeitsnachweise	356
11.7.5	Füge- und Lösekraftberechnung	357
11.7.6	Stabilitätsnachweis für den Fügevorgang geschlossener Zylinderschnappverbindungen	357
11.8	Funktionsnachweise für geschlossene Kugelschnappverbindungen	357
11.8.1	Berechnungskonzept	357
11.8.2	Geometrisches Modell und Belastungsschema	358
11.8.3	Festigkeitskontrolle für Einführungszone sowie Füge- und Lösekraftberechnung	358
11.9	Gestaltungsbeispiele	359
11.9.1	Entformung von funktionsbedingten Hinterschneidungen	359
11.9.2	Verringerung der Hakenbeanspruchung und vereinfachte Montagemöglichkeiten durch Mehrfachhaken	360
11.9.3	Schnapphaken-gestaltung zur Reduzierung von Füge- und Lösekräften und zur Vermeidung unzulässiger Scherdeformationen	362
11.9.4	Werkzeugtechnisch günstige Gestaltung von Schnappverbindungen	364
11.9.5	Clip-Variationen	365

11.9.6	Geschlossene Zylinderschnappverbindungen (Ringschnappverbindungen) für große Lösekräfte . . . . .	365
11.9.7	Verformungsbegrenzung und Sicherung von Schnappverbindungen . . . . .	366
11.9.8	Schnappverbindungen als Verschlusselemente . . . . .	368
11.9.9	Gestaltung von Kugelschnappverbindungen . . . . .	369
11.9.10	Funktionskombinationen für Schnappverbindungen . . .	370
11.9.11	Bildquellen . . . . .	371
11.10	Berechnungsbeispiele . . . . .	371
<b>12</b>	<b>Berechnung von biegebeanspruchten Platten und Plattenstreifen . . . . .</b>	<b>379</b>
12.1	Einführung . . . . .	379
12.1.1	Aufgabenstellung . . . . .	379
12.1.2	Werkstoffdaten . . . . .	380
12.2	Membranplattenberechnung . . . . .	380
12.2.1	Kreismembranplatten mit gleichverteilter Druckbeanspruchung . . . . .	380
12.2.2	Rechteckmembranplatten mit gleichverteilter Druckbeanspruchung und gleicher Randeinspannung am Umfang . . . . .	382
12.3	Gestaltung und Berechnung versteifter Plattenstreifen und gerader Träger . . . . .	385
12.3.1	Rippengestaltung und Bemessungsrichtwerte für Formteile . . . . .	385
12.3.2	Zielstellung und Anwendungsbereiche für Plattenstreifen . . . . .	386
12.4	Berechnung von biegesteifen Verbundplattenstreifen . . . . .	388
12.4.1	Einleitung und Voraussetzungen . . . . .	388
12.4.2	Berechnungsgleichungen für biegebeanspruchte Verbundplattenstreifen . . . . .	389
12.5	Berechnungsdaten für ausgewählte Biegelastfälle . . . . .	391
12.5.1	Maximales Biegemoment ( $M_{bmax}$ ) und maximale Querkraft ( $Q_{max}$ ) sowie Konstanten $g$ und $z$ für ausgewählte Biegelastfälle gerader Träger und Plattenstreifen . . . . .	391

12.5.2	Gleichförmig gekrümmter Haken mit Kreisquerschnitt unter Zugbelastung .....	392
12.6	Berechnungsbeispiele .....	392
<b>13</b>	<b>Berechnung und Gestaltung zylindrischer Pressverbindungen .....</b>	<b>397</b>
13.1	Einführung .....	397
13.1.1	Verbindungsprinzip und Fügebedingungen .....	397
13.1.2	Haftreibungskoeffizient und Werkstoffdaten .....	399
13.1.3	Toleranzdaten und Belastungsgrößen .....	400
13.2	Bestimmung von Fugenpressung und Übermaß .....	402
13.2.1	Passungssysteme nach DIN EN ISO 286 und Näherungswerte für Pressfugendurchmesser .....	402
13.2.2	Bestimmung der Fugenpressung .....	403
13.2.3	Anwendungsbedingte Maßverschiebungen und Maßstreuungen der Passteile .....	405
13.2.4	Bestimmung und Tolerierung der Fügedurchmesser durch Passungsberechnung nach DIN EN ISO 286 (2010) .....	406
13.3	Einpresskräfte und Stabilitätsnachweise .....	408
13.3.1	Einpresskräfte ( $F_E$ ) .....	408
13.3.2	Beulstabilitätsnachweise .....	409
13.4	Berechnungsbeispiel .....	410
<b>Index</b>	.....	<b>413</b>



# Vorwort

Diese ausgewählten Arbeitsunterlagen zur Entwicklung und Konstruktion von Kunststoffteilen entstanden aus einer Studien- und Arbeitsblattsammlung für die Ausbildung von Kunststoffingenieuren und für die Weiterbildung von Technikern und Ingenieuren, die mit der Entwicklung, Herstellung und Anwendung von Kunststoffteilen befasst waren und sind.

Die inhaltliche Darstellung der Themen und deren Weiterentwicklung beziehen sich auf einen Zeitraum und Erfahrungen von ca. 55 Jahren.

Bei der Auswahl der Themen wurde vom Autor angestrebt, dass diese dem Leser aktuelle und möglichst originelle Anregungen und praktische Nutzungsmöglichkeiten bieten können. Es handelt sich um eine analoge Basis speziellen Fachwissens, die durch entsprechende Software für praktische Anwendungen digital aufbereitet werden kann.

Die Literaturangaben beziehen sich in erster Linie auf die Ursprungs- und Einstiegsliteratur des Autors für die Zielstellungen der jeweiligen Themen. Damit lassen sich die zeitlich zurückliegenden Erscheinungsjahre erklären. Weiterführende neuere Literatur ist nur vermerkt, wenn damit ein nennenswerter Erkenntniszugewinn verbunden war. Die Leser des Buches sollten keine umfangreiche Literaturrecherche erwarten.

Die Struktur und der Stil des Buches beruht auf seiner Herkunft aus einer Studien- und Arbeitsblattsammlung. Die Vermittlung von autonomen und anwendungsorientierten Kapiteln führt zu einer großen Informationsdichte mit textlichen, bildhaften und tabellarischen Darstellungen. Diese Form verlangt vom Leser technisch-naturwissenschaftliche Grundlagenkenntnisse, vermeidet aber bewusst eine umfangreiche Lehrbuchdarstellung.

Die Arbeitsunterlagen werden jeweils eingeführt durch Beschreibung des Anwendungsgegenstandes bzw. Geltungsbereiches mittels Basisdefinitionen sowie durch Angabe von Normen, Fachliteratur und sonstigen Quellen. Demonstrations- und Berechnungsbeispiele beziehen sich auf unterschiedliche Anwendungszeitebenen und betreffen nur einen kleinen Ausschnitt der Anwendungsmöglichkeiten. Die

Art der Darstellung soll zur strukturierten und algorithmischen Denk - und Arbeitsweise unterschiedlichen Umfangs anregen.

Berechnungsvorschriften werden durch Quellenangaben und Randbedingungen beschrieben, wobei detaillierte Ableitungen meist nicht angegeben sind. Diese Ableitungen können aber im Bedarfsfall mit üblicher Fachliteratur, Datensammlungen und den speziellen Quellenangaben nachvollzogen werden. Berechnungsergebnisse aus Aufgabenstellungen zur Entwicklung und Konstruktion von Kunststoffteilen sind im Vergleich zum Einsatz anderer Werkstoffe (z. B. Stähle) häufig relativ ungenau. Dies resultiert vor allem aus den Streubereichen der Werkstoffdaten infolge komplexer Einflüsse, so dass auch ein gesteigerter Berechnungsaufwand meist nicht sinnvoll ist. Der Autor empfiehlt daher Grenzwertabschätzungen (Maximum-Minimum-Methode), die in vielen Fällen praktisch sinnvolle Entscheidungen ermöglichen. In Zweifelsfällen müssen dann Entscheidungen ohnehin durch praxisnahe Experimente und Erprobungen unterstützt werden, sofern dies wirtschaftlich und aus Sicherheitsgründen geboten ist.

Bei der Nutzung der Anwendungsunterlagen ist zu beachten, dass gleiche Kurzzeichen u. U. unterschiedliche Sachverhalte bzw. Dateninhalte bezeichnen, da technische Normen und Anwendungsvorschriften dies erfordern (z. B. Stabilitätsrechnung; Zahnradberechnung; Wärmeübertragung). Unterschiedliche inhaltliche Zuordnungen zu gleichen Kurzzeichen sind u. U. sogar in Abschnitten des gleichen Kapitels zu beachten (z. B. Kapitel 5).

Kunststoffwerkstoffe werden im Buch mit normierten bzw. üblichen Kurzzeichen bezeichnet. Nur in Ausnahmefällen werden Handelsnamen angegeben, sofern dies für die Spezifizierung der Kunststoffe hilfreich ist. Davon unberührt ist die Notwendigkeit der detaillierten Typangabe (Liefernomenklatur) des konkreten Kunststoffs in der Konstruktionsdokumentation der Kunststoffteile.

Wesentliche Teile des Buchinhalts stehen als Windows-Software der Makrolar GbR Berlin zur Verfügung, an deren Entwicklung und Vertrieb Dipl.- Ing. Frank Neumann entscheidend beteiligt war und ist. Aus der langen Zusammenarbeit mit Herrn Neumann ergaben sich viele dankenswerte Impulse für die Arbeit am vorliegenden Buch.

Der Autor möchte sich beim Hanser Verlag für die Herausgabe des Buches bedanken. Insbesondere gilt mein Dank den Lektoren Herrn Dr. Smith und Frau Wittmann und dem für die Herstellung zuständigen Herrn Strohbach, die mich durch geduldige und kreative Zusammenarbeit unterstützten.

Januar 2021

*Prof. Dipl.-Ing. B.-R. Meyer*



# Der Autor

Herr Prof. Meyer ist Chemieingenieur für Kunststofftechnologie (Ing.-Schule Fürstenwalde), Diplomingenieur für Maschinenbau und Fertigungstechnik mit Spezialisierung Kunststofftechnik (TU Dresden) und hat einen Diplomabschluss in Fachschulpädagogik (TU Dresden).

Er war in der Industrie als Spritzgießtechnologe und als Abteilungsleiter Forschung und Entwicklung für Kunststoffanwendung in der Kältetechnik tätig.

An der Ing.-Schule Fürstenwalde war er Dozent und Fachgruppenleiter für Kunststofftechnik und im Studiengang Kunststofftechnik an der TH Wildau hat er eine Professur geleitet.

Des Weiteren ist er Gesellschafter der Makrolar GbR Berlin für Entwicklung und Vertrieb kunststofftechnischer Software.

Herr Prof. Meyer war Mitglied des Fachausschusses „Toleranzen für Kunststoff-Formteile“ des DIN-Institut Berlin zu Erarbeitung der DIN 16742 als Nachfolgenorm von DIN 16901.



Prof. Dipl.-Ing. B.-R. Meyer



# 1

# Struktur – Eigenschafts- beziehungen der Polymere

## ■ 1.1 Übersichten

### **Einführung**

Die Eigenschaften von Stoffen lassen sich aus ihrer Struktur ableiten. Polymere besitzen die größte Strukturvielfalt der von Menschen genutzten Werk- und Funktionsstoffe. Die Beschreibung der Zusammenhänge zwischen stofflicher Struktur und Eigenschaften dient als werkstofftechnische Grundlage für die nachfolgenden Kapitel.

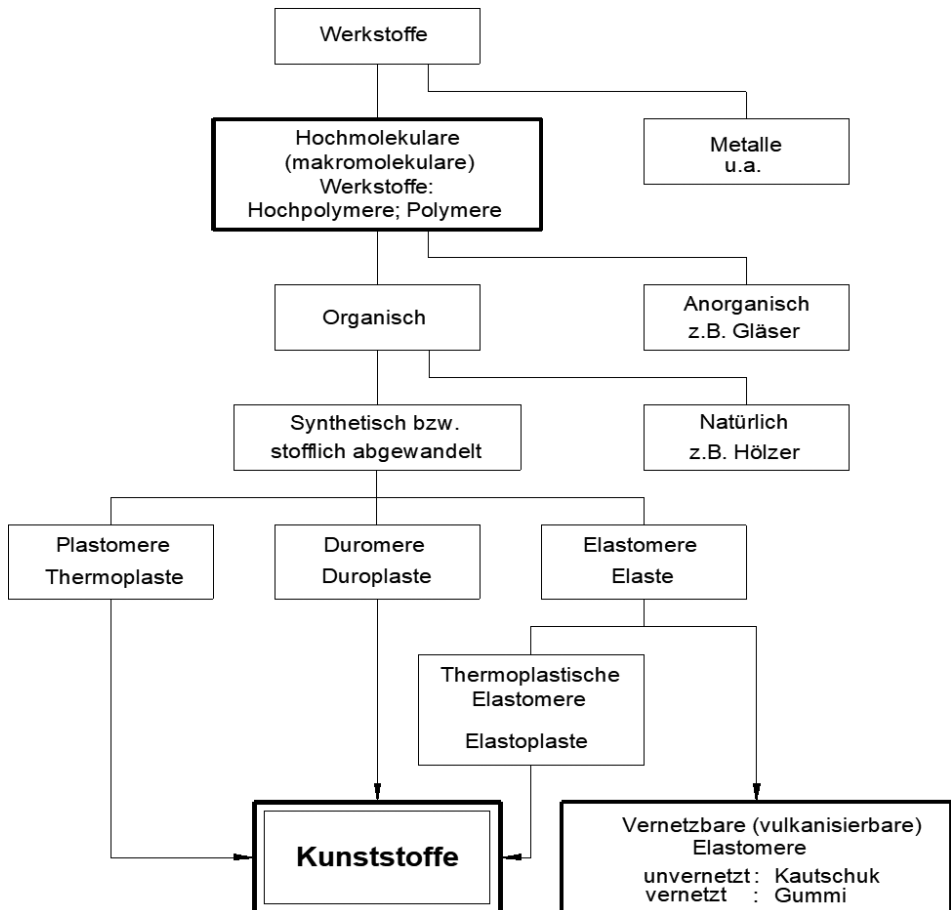
Die wichtigsten Quellen des vorliegenden Kapitels sind folgende Veröffentlichungen:

Meyer, B.-R.: Werkstoffkunde der Kunststoffe. In: Saechtling – Kunststofftaschenbuch, Carl Hanser Verlag, 26. Ausgabe 1995 ff.

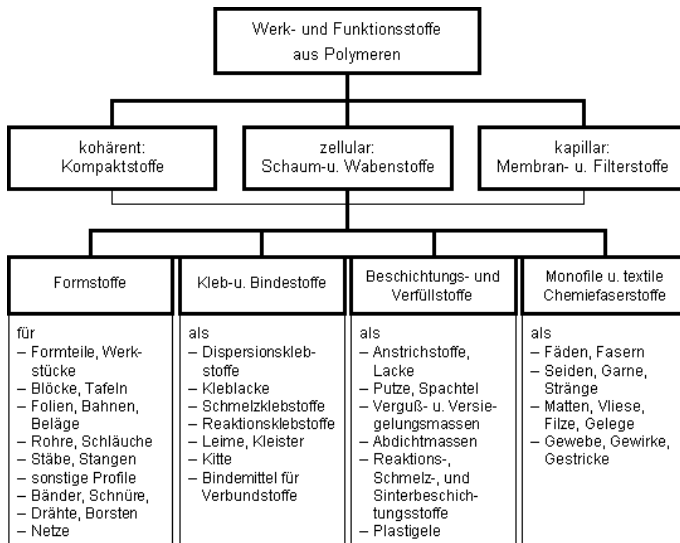
Meyer, B.-R.: Kunststoffeigenschaften und deren Einfluss auf die Formteile unter Berücksichtigung der Maßhaltigkeit. In: Maßhaltige Kunststoff-Formteile, Carl Hanser Verlag, München 2013/2019.

Erforderlichenfalls werden weitere Quellen in den jeweiligen Abschnitten zitiert.

## Einordnung der Kunststoffe



Einordnung der Kunststoffe in das Werkstoffgebiet



Einordnung polymerer Werk- und Funktionsstoffe nach Makrostruktur und Anwendung

Normen zur Kennzeichnung von Polymeren (Benennung und Kurzzeichen)	
DIN EN ISO 1043-1	Basis-Polymere und ihre besonderen Eigenschaften
DIN EN ISO 1043-2	Füllstoffe und Verstärkungsstoffe
DIN EN ISO 1043-3	Weichmacher
DIN EN ISO 1043-4	Flammschutzmittel
DIN EN ISO 18064	Thermoplastische Elastomere
DIN ISO 1629	Kautschuk und Latices
DIN EN ISO 11469	Kunststoffe – Sortenspezifische Identifizierung und Kennzeichnung von Kunststoff-Formteilen
DIN EN ISO 472	Kunststoffe – Fachwörterverzeichnis

### Eigenschaftsprüfung der Polymere

Die Eigenschaftsprüfung und damit die Angabe entsprechender Vorschriften und Normen ist nicht Gegenstand dieses Kapitels. Diesbezüglich sei auf Kapitel 2 „Systematische Kunststoffauswahl für Formstoffe“ verwiesen.

## ■ 1.2 Konstitution und Konfiguration der Makromoleküle

### 1.2.1 Zusammensetzung, Größe und Gestalt der Makromoleküle

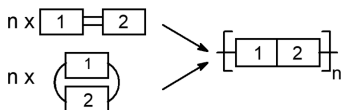
#### Molekülzusammensetzung der Polymere

Am atomaren Aufbau der Polymermoleküle sind hauptsächlich die Nichtmetallelemente Kohlenstoff (C), Wasserstoff (H) und Sauerstoff (O) beteiligt. Relativ häufig treten noch Stickstoff (N), Chlor (Cl), Fluor (F) und Schwefel (S) auf. Wegen ihrer Ähnlichkeit zu biologischen Molekülen werden diese als organische Verbindungen bezeichnet. Sogenannte halborganische Verbindungen (z.B. Silikone) enthalten auch Silizium (Si). Die chemische Hauptvalenzbindung zwischen den Atomen wird durch die Elektronenpaarbindung (Atombindung, Kovalente Bindung) bewirkt. In Sonderfällen spielt die Ionenbindung (Ionomere) eine Rolle.

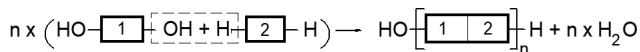
Organische Polymere werden synthetisch hergestellt (meist aus dem Rohstoff Erdöl) oder aus Biopolymeren (z.B. Stärke, Cellulose, Eiweiß) stofflich abgewandelt.

#### Polymerbildungsreaktionen

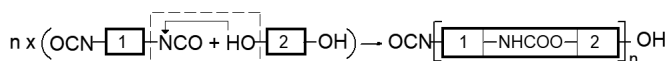
**Polymerisation:** Monomere verknüpfen sich durch Aufspaltung von Mehrfachbindungen oder Ringöffnung über eine Kettenreaktion zu Polymerisaten.



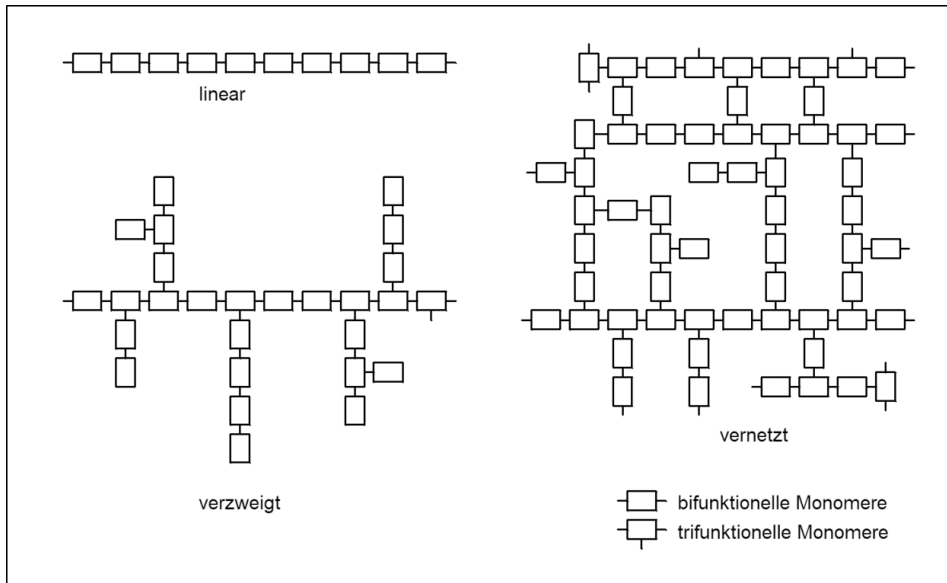
**Polykondensation:** Monomere verknüpfen sich durch Abspaltung von Reaktionsprodukten (z. B. Wasser) über eine Stufenreaktion zu Polykondensaten (z. B. Veresterung).



**Polyaddition:** Monomere verknüpfen sich durch intermolekulare „Wanderung“ eines Wasserstoffatoms ohne Abspaltung von Reaktionsprodukten über eine Stufenreaktion zu Polyaddukten (z. B. Urethanreaktion).



## Kovalente Grundstrukturen von Polymeren



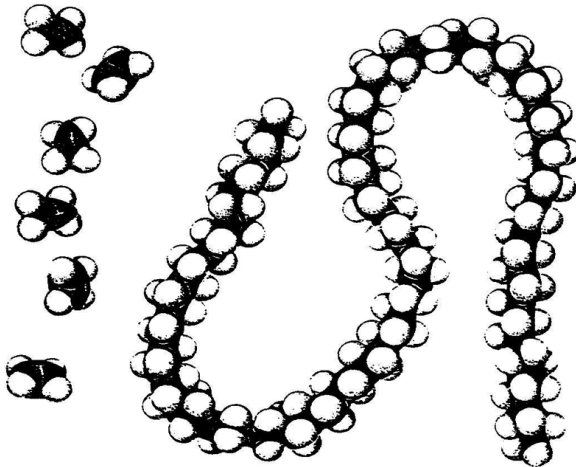
## Konstitution thermoplastischer Copolymere

Random- oder statistische Copolymere		Statistische Monomeranordnung
Sequenz-Copolymere	$\left[ \text{A-B} \right]_n$ $\left[ \text{A-A-B-B} \right]_n$	Periodische Anordnung von Monomersequenzen
Segmentblock-Copolymere	$\left[ \left( \text{A} \right)_x \left( \text{B} \right)_y \right]_n$	Segmentierte Anordnung von homopolymeren Molekülblöcken
Teleblock-Copolymere	$\left[ \text{A} \right]_x \left[ \text{B} \right]_y \left[ \text{A} \right]_x$ $\left[ \text{A} \right]_x \left[ \text{A-B-A} \right]_y \left[ \text{A} \right]_x$	Anordnung von endständigen Molekülblöcken gleicher Monomerart an einem homo- oder copolymeren Mittelblock
Pfropf-Copolymere		Aufpfropfen von Molekülblöcken auf einen Basisblock zu verzweigten Makromolekülen

Nach der Anzahl unterschiedlicher Monomerarten werden u. a. Bi-, Ter-, Quater-Copolymere unterschieden. Block-Copolymere werden nach der Anzahl der molekülbildenden Blöcke in Di-, Tri-, Tetra-, usw.-Block-Copolymere unterschieden.

## Moleküllängenrelation von Polymeren

Polymere bestehen aus Makromolekülen, die aus gleichartigen oder verschiedenen Monomeren aufgebaut sind. Für technisch genutzte, unvernetzte Polymere ergeben sich bei angenommenen Molekülfadendicken von 1 mm etwa 2 m bis 200 m gestreckte Moleküllängen mit unterschiedlicher Längenverteilung. Es handelt sich im wahrsten Sinne um Riesenmoleküle.



### Molekülmassen von Polymeren

$6 \times 10^{23}$  Moleküle eines Stoffes (1 mol) wiegen:

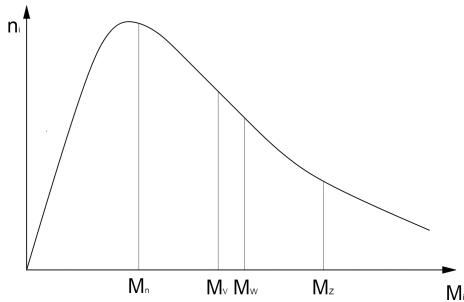
- **bei niedermolekularen Stoffen:**
  - wie 2 g  $H_2$  oder
  - wie 18 g  $H_2O$  oder
  - alle anderen niedermolekularen Stoffe bis 500 g/mol
- **bei Oligomeren<sup>1)</sup>:** über 0,5 bis 10 kg/mol
- **bei Polymeren<sup>2)</sup>:**
  - übliche Thermoplaste über 10 kg/mol bis 1 t/mol oder
  - Spezial- und Biopolymere über 1 t/mol

<sup>1)</sup> Oligomere sind Vorstufenverbindungen echter Polymere.

<sup>2)</sup> Bei Duroplasten und Gummi ist die Angabe von Molekülmassen wegen der Molekülvernetzung nicht sinnvoll bzw. nicht möglich.



## Molekülmasseverteilung (Polymolekularität) und Molekülmassemittelwerte von Polymeren



$n_i$ : Molekülzahl einer Molekülfraktion

$M_i$ : Molekülmasse der Molekülfraktion

$M_n$ : Zahlenmittelwert

$M_w$ : Gewichtsmittelwert

$M_v$ : Viskositätsmittelwert





$M_z$ : Zentrifugenmittelwert



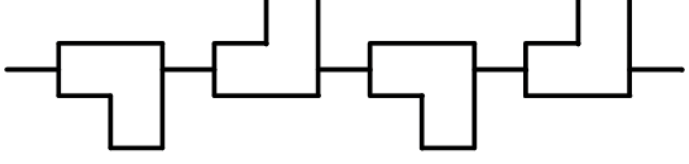
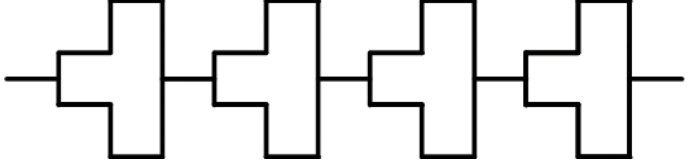
Vielfalt und Streubreite der Molekülmasse sowie die daraus je nach Prüfverfahren abgeleiteten Molekülmassemittelwerte definieren komplexe Einflüsse auf das Fließverhalten (Rheologie) sowie auf thermische und mechanische Eigenschaften. Die Uneinheitlichkeit  $U$  ist als Maß der Streubreite der Molekülmassen quantifizierbar:



$$U = \frac{M_w}{M_n} - 1$$

### Verzweigung und Steifheit der Makromoleküle

Die Beweglichkeit der Makromoleküle ist von entscheidender Bedeutung für die Stoffeigenschaften. Sie wird erheblich durch die Molekülgestalt beeinflusst. Aspekte dieser Gestalteinflüsse werden nachstehend schematisch dargestellt:

Verzweigungsarten	
	unverzweigt
	kammartig, kurzkettig
	kammartig, langkettig
	strauchartig

Molekülsteifheit	
	Kleine symmetrische Molekülsegmente sind über Einfachbindungen frei beweglich, z. B. PE, PTFE, POM
	Behinderte Drehbarkeit der Molekülsegmente durch Mehrfachbindungen, z. B. BR, TOR
	Großvolumige (sperrige) Substituenten ergeben einfach- und doppelt-asymmetrische Molekülsegmente mit eingeschränkter Beweglichkeit, z. B. PS, PC, PPS, PSU
	

Molekülsteifheit	
	Verknüpfungen von Ringstrukturen nach dem Leiterprinzip ergeben starre Molekülsegmente, z. B. LCP
	Extreme Bewegungseinschränkungen bei durchgängiger Leiterstruktur, z. B. Polyamide

## 1.2.2 Zwischenmolekulare Kräfte (ZMK)

Wenn für den Zusammenhalt der Moleküle nur chemische Hauptvalenzbindungen zuständig wären, müssten alle niedermolekularen organischen Stoffe bei Raumtemperatur gasförmig sein, d. h. die kondensierten Zustände (flüssig, fest) sind damit nicht erklärbar. Tatsächlich wirken bei allen Stoffen mit kovalenter Atombindung noch zwischenmolekulare Kräfte (ZMK), die durch elektrostatische Anziehung infolge temporärer oder permanenter Ladungsdifferenzen zwischen Atomen oder Molekülteilen wirksam sind.



Generell haben ZMK geringere Bindungsenergien als kovalente Atombindungen.

Die Wirksamkeit der ZMK erfordert eine Mindestannäherung der Molekülteile, die bei zunehmender Wärmebewegung infolge Temperaturerhöhung mehr oder weniger behindert bzw. aufgehoben wird. Die Gesamtheit aller wirksamen Einzelkräfte der ZMK ist die **Molkohäsion** der Stoffe, welche für die davon abhängigen makroskopischen Eigenschaften maßgebend ist.

Nachfolgend werden die für Polymere wichtigsten ZMK stichpunktartig beschrieben:

### ■ Dispersionskräfte:

- Allseitig wirksame, ungerichtete Anziehung zwischen fluktuierenden Ladungsschwerpunkten von Atomorbitalen (temporäre Atomdipole). Dispersionskräfte sind bei allen Stoffen mit einem gleichförmigen Kraftfeld schwacher Wechselwirkungen wirksam. Temperatureinfluss gering. Beitrag zur Molkohäsion meist groß.

■ **Induktionskräfte:**

- Wenig gerichtete, induzierte Anziehung zwischen permanenten Molekülgruppendifolen und polarisierbaren Molekülteilen mit „verschiebbaren“ Elektronen (z. B.  $\pi$ -Elektronen in Aromaten und in konjugierten Mehrfachbindungen). Temperatureinfluss und Beitrag zur Molkohäsion meist gering.

■ **Dipol- oder Orientierungskräfte:**

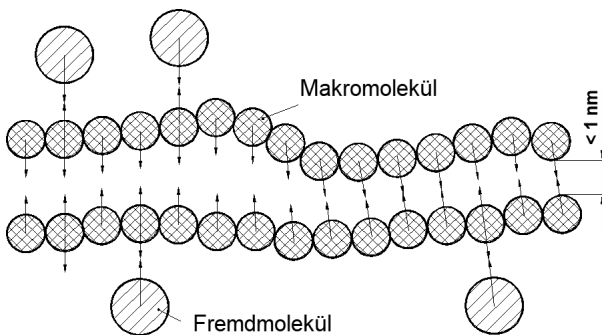
- Gerichtete Anziehung zwischen permanenten Molekülgruppendifolen. Temperatureinfluss auf die Richtkraftwirkung groß. Beitrag zur Molkohäsion abhängig von Dipolkonzentration und Dipolstärke, u. U. groß.

■ **Wasserstoffbrückenkräfte:**

- Gerichtete Anziehung zwischen speziellen permanenten Molekülgruppendifolen, die einerseits als Protonendonator mit „verschiebbaren“ H-Atomen (X-H) und andererseits als Protonenakzeptor (Y) wirken: X-H ... Y. Temperatureinfluss und Beitrag zur Molkohäsion u. U. sehr groß. Die Ladungsausrichtung kann bis zur Vorstufe einer Ionenbindung führen.





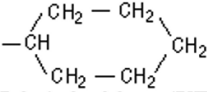
Es sei vermerkt, dass für ZMK unterschiedliche Begriffe und Zuordnungen verwendet werden, auf die hier nicht eingegangen wird. Sind ausschließlich Dispersionskräfte ohne messbares Dipolmoment wirksam, werden diese Stoffe als unipolar eingestuft. Stoffe mit messbaren Dipolmomenten infolge wirksamer Richtungskräfte (Induktions-, Dipol- und Wasserstoffbrückenkräfte) werden als polar bezeichnet, wobei stoffabhängig das Ausmaß der Polarität sehr unterschiedlich sein kann.

Bei der Wechselwirkung unterschiedlicher Stoffe miteinander spielen die ZMK u. U. eine entscheidende Rolle bezüglich Mischbarkeit, Löslichkeit Quellbarkeit, Medienaufnahme, Benetzbarkeit, Permeation, Weichmacherwirksamkeit, Wärmeformbeständigkeit, dielektrische Verluste und anderer Eigenschaften. Beispielsweise nehmen unpolare Polymere kein (polares) Wasser auf und haben sehr geringe dielektrische Verluste.




## 1.2.3 Chemische Struktur thermoplastischer Polymere

### 1.2.3.1 Polymethylene

Polyethylene (PE)	$\left[ \text{CH}_2 - \text{CH}_2 \right]_n$		
Polyvinyle	$\left[ \text{CH}_2 - \underset{\text{R}}{\text{CH}} \right]_n$		
R:	$-\text{CH}_3$ Polypropylen (PP)	$-\text{C}_2\text{H}_5$ Polybuten-1 (PB)	 Polystyrol (PS)
$\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\   \\ -\text{CH}_2 - \text{CH} \\   \\ \text{CH}_3 \end{array}$ Poly-4-methylpenten-1 (PMP)	$\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\   \\ -\text{O} - \text{CH}_2 - \text{CH} \\   \\ \text{CH}_3 \end{array}$ Polyvinylisobutylether (PVBE)	  $-\text{N}$  Polyvinylcarbazol (PVK)	
$\begin{array}{c} \text{CO} - \text{CH}_2 \\   \\ -\text{N} \\   \\ \text{CH}_2 - \text{CH}_2 \end{array}$ Polyvinylpyrrolidon (PVP)	$-\text{CN}$ Polyacrylnitril (PAN)	$-\text{OH}$ Polyvinylalkohol (PVAL)	
 Polyvinylcyclohexan (PVZH)	$-\text{O} - \text{COCH}_3$ Polyvinylacetat (PVAC)	$-\text{C}(\text{OOC}_4\text{H}_9)$ Polybutylacrylat (PBA)	
	$-\text{Cl}$ Polyvinylchlorid (PVC)	$-\text{F}$ Polyvinylfluorid (PVF)	

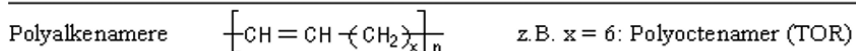
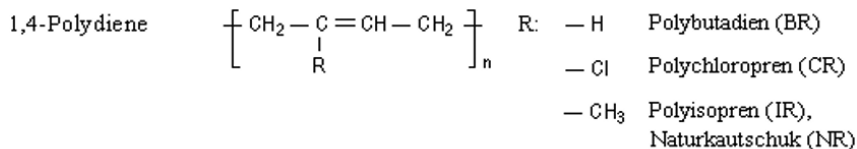
Polyvinylidene	$\left[ \text{CH}_2 - \underset{\text{R}}{\overset{\text{R}}{\text{C}}} \right]_n$	R:	$-\text{Cl}$ Polyvinylidenchlorid (PVDC)
			$-\text{F}$ Polyvinylidenfluorid (PVDF)

Polymethylvinyle	$\left[ \text{CH}_2 - \underset{\text{R}}{\overset{\text{CH}_3}{\text{C}}} \right]_n$	R:	$-\text{CH}_3$ Polyisobutylen (PIB)
			$-\text{C}(\text{OOCCH}_3)$ Polymethylmethacrylat (PMMA)
			 Poly- $\alpha$ -Methylstyrol (PMS)

Perhalogenierte Polyvinyle	$\left[ \text{CF}_2 - \underset{\text{R}}{\overset{\text{F}}{\text{C}}} \right]_n$	R:	$-\text{F}$ Polytetrafluorethylen (PTFE)
			$-\text{Cl}$ Polychlortrifluorethylen (PCTFE)
			$-\text{CF}_3$ Polyhexafluorpropylen (PHFP)
			$-\text{O} - \text{Alkyl}$ Polyperfluoralkylether

Polyvinylacetale	$\left[ \text{CH}_2 - \underset{\text{O}}{\text{CH}} - \text{CH}_2 - \underset{\text{O}}{\text{CH}} \right]_n$	R:	$-\text{CH}_2$ Polyvinylformal (PVFM)
			$-\text{C}_4\text{H}_7$ Polyvinylbutyral (PVB)

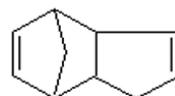
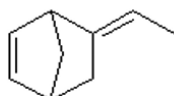
### 1.2.3.2 Polydiene, Polyalkenamere, Polycycloolefine (COC)



Polycycloolefine, Polycyclodiene

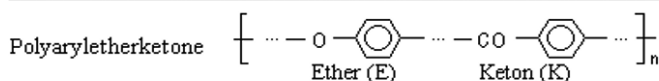
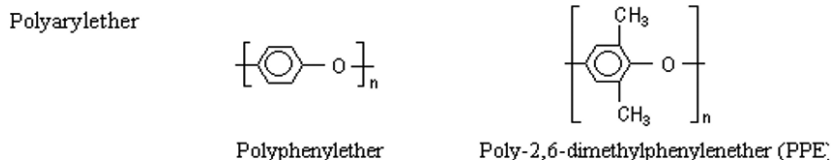
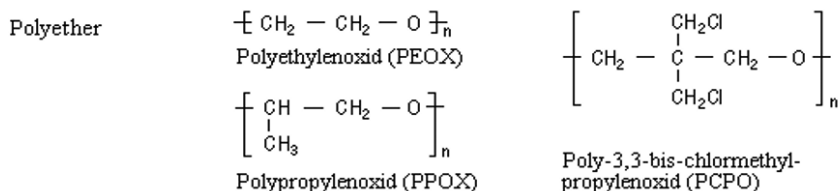
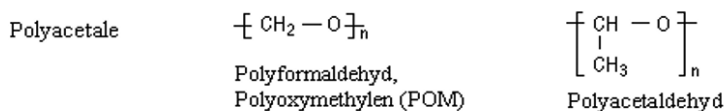
Homo- u. Copolymere von Cycloolefinen, auch zusammen mit anderen Monomeren, zur Herstellung unterschiedlicher Thermoplaste, Elastomere und Duromere.

Cycloolefine:



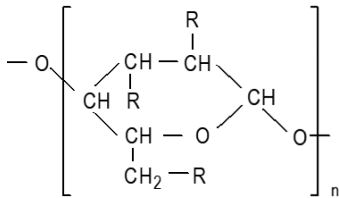
Norbomen (N) Ethylidennorbomen (EN) Dicyclopentadien (DCP)

### 1.2.3.3 Polyacetale, Polyether, Polyarylether, Polyaryletherketone



Benennung nach Aufeinanderfolge der E- u. K-Gruppen  
Beispiele: PEK, PEEK, PEKK, PEEKK, PEKEKK

### 1.2.3.4 Cellulosederivate



**Cellulosederivate** sind durch Substitutionsart und Umsetzungsgrad der Hydroxylgruppen ( $R = -OH$ ) der nativen Cellulose bzw.  $\alpha$ -Cellulose sowie durch deren spezielle Präparation darstellbar.

#### Celluloseester R

$—O—COCH_3$   
Celluloseacetat (CA)

$—O—COCH_3$  (vollst. subst.)  
Cellulosetriacetat (CTA)

$—O—COC_2H_5$   
Cellulosepropionat (CP)

$—O—COCH_3$  u.  $—O—COC_2H_5$   
Celluloseacetopropionat (CAP)


$—O—COCH_3$  u.  $—O—COC_3H_7$   
Celluloseacetobutyrat (CAB)

$—O—NO_2$   
Cellulosenitrat (CN)

#### Celluloseether R

$—O—CH_3$   
Methylcellulose (MC)

$—O—C_2H_5$   
Ethylcellulose (EC)

$—O—CH_2—$    
Benzylcellulose (BC)

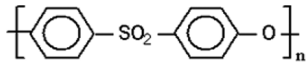
$—O—CH_2COOH$   
Carboxymethylcellulose (CMC)

#### Mercerisierte<sup>3</sup> Cellulose

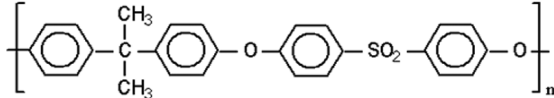
- Hydratcellulose, Cellulosehydrat, Zellglas (CH)
- Pergamentierte Hydratcellulose, Vulkanfiber (VF)

<sup>3)</sup> Die Mercerisation (Mercerisation) ist ein Veredlungsverfahren für Baumwolle

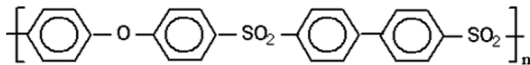
### Polyarylethersulfone, Polyarylsulfide



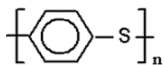
Polyethersulfon (PES)



BisphenolA-Polyethersulfon (PSU)



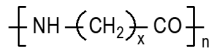
Polyphenylenethersulfon (PPSU)



Polyphenylensulfid (PPS)

### 1.2.3.5 Polyamide (PA) und lineare Polyurethane (PUR)

#### Homopolyamide aus Aminosäuren oder deren Lactame



Beispiele	PA <sub>Z</sub>
Polycaprolactam	PA6
Poly11aminoundecanamid	PA11
Polylaurinlactam	PA12

Z = C-Zahl der C Aminosäure bzw. des Lactams (Z = x+1)

#### Aliphatische Homopolyamide aus unverzweigten Diaminen u. Dicarbonsäuren



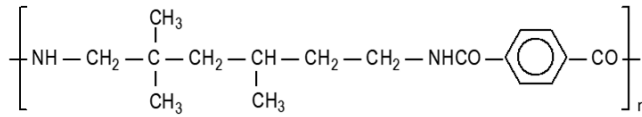
Beispiele	PA <sub>Z1Z2</sub>
Polytetramethylenadipinamid	PA46
Polyhexamethylenadipinamid	PA66
Polyhexamethylenacelainamid	PA69
Polyhexamethylensebacinamid	PA610
Polyhexamethylendodecanamid	PA612

Z1 = C-Zahl des Diamins (Z1 = x)

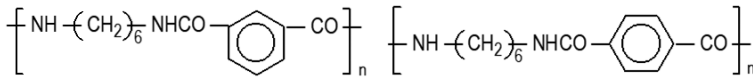
Z2 = C-Zahl der Dicarbonsäure (Z2 = y+2)



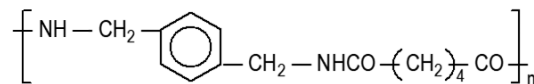
### Aromatische Homopolyamide (Polyarylamide)



Polytrimethylhexamethylenterephthalamid (PANDT (PA6-3-T))



Polyhexamethylenisophthalamid (PA6I) Polyhexamethylenterephthalamid (PA6T)



Poly-m-xylylenadipinamid (PAMXD6)

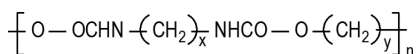
Kurzzeichenbildung wie aliphatische Polyamide, wobei für verzweigte aliphatische Diamine sowie für aromatische Diamine und Dicarbonsäuren Buchstabensymbole nach ISO 1874 festgelegt sind.

### Copolyamide

Kurzzeichenbildung für Copolymere nach ISO 1043/DIN 7728 aus den monomeren Coreaktanten

*Beispiele:* PA6/12; PA6/69; PA66/6; PA66/610; PA6/6T; PA12/MACMI; PA12/IPDI; PA6I/MACMT; PA6T/6I; PA6T/IPDI/6

### Polyurethane aus aliphatischen Diisocyanaten und Diolen

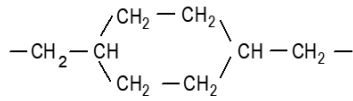
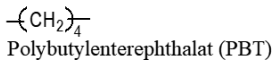
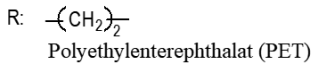
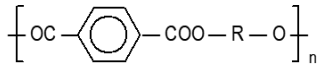


x = 6: 1,6-Hexamethyldiisocyanat

x = 4: 1,4-Butandiol

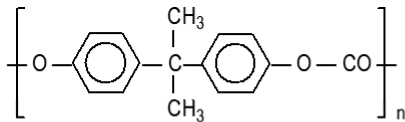
### 1.2.3.6 Lineare Polyarylester:

#### Polyalkylenterephthalate

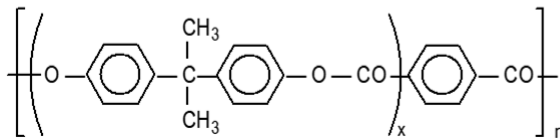


Polycyclohexylterephthalat (PCT)

#### Polycarbonate

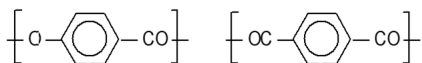
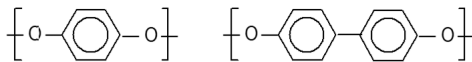


BisphenolA-Polycarbonat (PC)



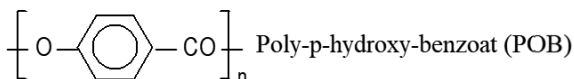
Polyterephthalsäure-  
estercarbonat (PEC)

#### Polyhydroxybenzoate

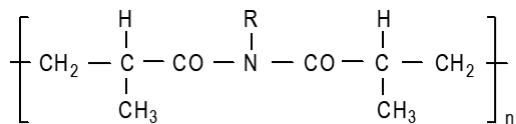


Homo- u. Copolyester von Benzoesäurederivaten mit Strukturelementen unterschiedlichster Anordnung.

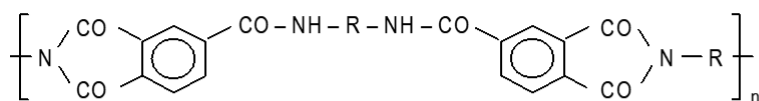
In Verbindung mit aliphatischen Strukturen (Spacer) auch Basis für flüssigkristalline Polymere (LCP).



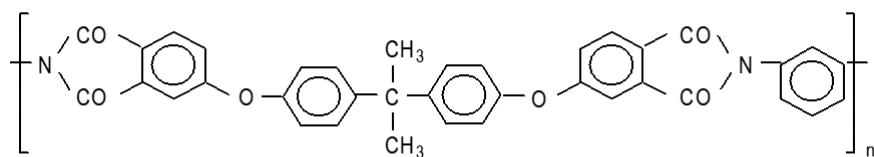
## 1.2.3.7 Polyimide (PI)



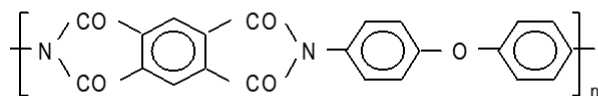
Polymethacrylimid (PMI)



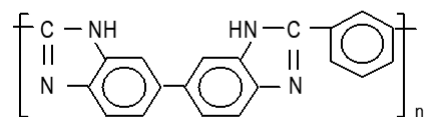
Polyamidimid (PAI)



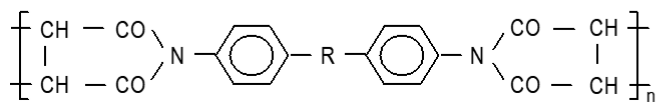
Polyetherimid (PEI)



Polydiphenyloxidpyromellithimid (PPI)



Polybenzimidazol (PBI)



Polybismaleinimid (PBMI)

## 1.2.4 Nomenklatur und Kurzzeichen spezieller Polymergruppen

### Duroplastharze

Duroplaste werden durch engmaschige chemische Vernetzung aus härtbaren Kunstharzen hergestellt. Nachstehend soll durch eine Benennung wichtiger Vertreter die stoffliche Vielfalt dieser Polymergruppe veranschaulicht werden.

Kurzzeichen	Harzbasis	Kurzzeichen	Harzbasis
PF	Phenol – F.	EP	Epoxid
CF	Kresol – F.	VE	Vinylester
CSF	Kasein – F.	PDAP	Polydiallylphthalat
UF	Harnstoff – F.	KW-X	Kohlenwasserstoff
MF	Melamin – F.	SI-X	Silikon
MPF	Melamin-Phenol – F.	PUR-X	Polyurethan
UP	Ungesättigte Polyester	PBI-X	Polybenzimidazol
(MF+UP)	Blend (IPN)	PBMI-X	Polybismaleinimid

Hinweise: F. = Formaldehyd X = vernetzbar

**Phenoplaste:** Duroplaste aus Phenolen und Aldehyden.

**Aminoplaste:** Duroplaste aus Harnstoff, Melamin, Anilin und Aldehyden.

Kurzzeichen für ausgewählte Kautschuke	
<b>ABR</b> Acrylester-Butadien-Kautschuk	<b>IIR</b> Butylkautschuk (Isobutylen/Isopren)
<b>ANM</b> Acrylat-Acrylnitril-Kautschuk	<b>IR</b> Isoprenkautschuk (Polyisopren)
<b>BR</b> Butadienkautschuk (Polybutadien)	<b>NR</b> Naturkautschuk (nat. Polyisopren)
<b>CR</b> Chloroprenkautschuk (Polychloropren)	<b>SBR</b> Styrol-Butadien-Kautschuk
<b>CSM</b> Sulfonylchloridkautschuk (Chlorsulfoniertes Polyethylen)	<b>TM</b> Polysulfidkautschuk (Thioplast)
<b>EPDM</b> Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk	<b>TOR</b> Octenamerkautschuk (Polyoctenamer)

**R (Rubber)** für ungesättigte Kohlenstoffketten

**M (Methylen)** für gesättigte Kohlenstoffketten

Kurzzeichen für ausgewählte thermoplastische Copolymere	
<b>ABS</b> Acrylnitril-Butadien-Styrol	<b>ETFE</b> Ethylen-Tetrafluorethylen
<b>AMMA</b> Acrylnitril-Methylmethacrylat	<b>MABS</b> Methylmethacrylat-Acrylnitril-Butadien-Styrol
<b>ASA</b> Acrylnitril-Styrol-Acrylester	<b>PA66/6</b> Copolyamid aus PA66 und PA6
<b>CAB</b> Celluloseacetobutyrat	<b>PA6/12</b> Copolyamid aus PA6 und PA12
<b>COC</b> Cyclopolyolefin	<b>SB</b> Styrol-Butadien
<b>EVAC</b> Ethylen-Vinylacetat	<b>VCVDC</b> Vinylchlorid-Vinylidenchlorid

### *Teleblockcopolymer*

- **TPS-SBS** Styrol-Butadien-Styrol
- **TPS-SEPS** Styrol-Ethylen/Propylen-Styrol
- **TPS-SEBS** Styrol-Ethylen/Buten-Styrol
- **TPS-SIS** Styrol-Isopren-Styrol

### *Segmentblockcopolymer*

- Basistypen
  - **TPA** Copolymere
  - **TPC** Copolyester
  - **TPU** Copolyurethane
    - Hartsegment: **TPU-AR** Aromatisch
    - Hartsegment: **TPU-AL** Aliphatisch
- Weichsegmente
  - **ES** Ester
  - **ET** Ether
  - **EE** Ester/Ether
  - **CE** Carbonat
  - **CL** Caprolacton
- Handelstypen
  - TPA-EE/ES/ET
  - TPC-EE/ES/ET
  - TPU-AREE/ARES/ARET
  - TPU-ARCE
  - TPU-ARCL
  - TPU-ALES/ALET

## ■ 1.3 Konformation und Aggregation der Makromoleküle

### 1.3.1 Einführung

Die folgenden Betrachtungen befassen sich mit dem Ordnungs- und Bewegungszustand der Makromoleküle (morphologische Struktur) bei vorgegebener chemischer